

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**



PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **2000035521 A**(43) Date of publication of application: **02.02.00**(54) **OPTICAL FIBER**

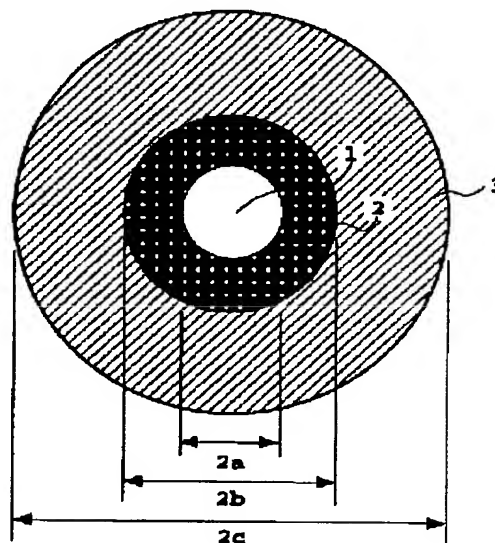
(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make it possible to evade the influence of an optical nonlinear phenomenon and the influence of material dispersion by providing the optical fiber with a core having a region of about several times of the wavelength of light and a clad having a diffraction grating of an inter-grating pacing equal to half the wavelength of the light.

SOLUTION: This optical fiber has the core 1 having the region of about several times of the wavelength of the light and the clad 2 which is arranged around the core 1 and is provided with the diffraction grating having the inner-grating pacing equal to half the wavelength of the light in at least a circumferential region adjacent to the core 1. The core 1 is a hole and the refractive index thereof is equal to the refractive index of air and is nearly 1. The core 1 formed of the hollow hole is free from a factor to scatter the light and is, therefore, most preferable. The circumferential region adjacent to the core 1 is provided with the diffraction grating having the inter-grating pacing equal to half the wavelength of the light. Namely, the optical fiber is provided with a photonic band gap structure over a diameter $2b$. The light may be confined and propagated in

the core 1 in such a manner that the light does not propagate in the radial direction from the center of the core 1 of the optical fiber.

COPYRIGHT: (C)2000,JPO



(51) Int. Cl

G02B 6/10**G02B 5/18****G02B 6/20**(21) Application number: **11116360**(22) Date of filing: **23.04.99**

(30) Priority: **07.05.98 JP 10124345**
15.05.98 JP 10132825

(71) Applicant: **NIPPON TELEGR & TELEPH
CORP <NTT>**

(72) Inventor: **KAWANISHI SATOKI**
OKAMOTO KATSUNARI

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-35521

(P 2 0 0 0 - 3 5 5 2 1 A)

(43) 公開日 平成12年2月2日(2000.2.2)

(51) Int. Cl. ⁷	識別記号	F I	ターマコード (参考)
G02B 6/10		G02B 6/10	C
5/18		5/18	
6/20		6/20	Z

審査請求 有 請求項の数14 O L (全7頁)

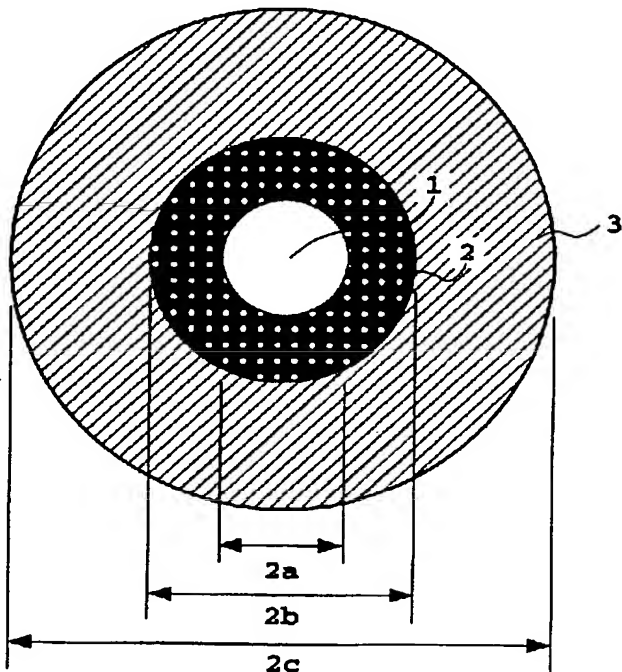
(21) 出願番号	特願平11-116360	(71) 出願人	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
(22) 出願日	平成11年4月23日(1999.4.23)	(72) 発明者	川西 悟基 東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本 電信電話株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平10-124345	(72) 発明者	岡本 勝就 東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本 電信電話株式会社内
(32) 優先日	平成10年5月7日(1998.5.7)	(74) 代理人	100077481 弁理士 谷 義一 (外1名)
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		
(31) 優先権主張番号	特願平10-132825		
(32) 優先日	平成10年5月15日(1998.5.15)		
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 光ファイバ

(57) 【要約】

【課題】 光非線形現象の影響や材料分散の影響を避けることができ、高速、高パワー光の伝送に大きな効果がある光ファイバを提供すること。

【解決手段】 光の波長の数倍程度の領域をもち、かつ中空孔により構成したコアと、光の波長の1/2に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光の波長の数倍程度の領域をもつコアと、

前記コアの周囲に配置され、光の波長の $1/2$ に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具えたことを特徴とする光ファイバ。

【請求項2】 前記クラッドにおける回折格子が、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を埋め込んだ格子構造から成ることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項3】 前記クラッドにおける回折格子が、屈折率の高い媒質中に屈折率の低い材料を埋め込んだ格子構造から成ることを特徴とする請求項1に記載の光ファイバ。

【請求項4】 光の波長の数倍程度の領域をもち、および中空であるコアと、

前記コアの周囲に配置され、光の波長の $1/2$ に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具えたことを特徴とする光ファイバ。

【請求項5】 前記クラッドにおける回折格子が、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を埋め込んだ格子構造から成ることを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ。

【請求項6】 前記クラッドにおける回折格子が、屈折率の高い媒質中に屈折率の低い材料を埋め込んだ格子構造から成ることを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ。

【請求項7】 光の波長の数倍程度の領域をもつコアと、

前記コアの周囲に配置され、光の波長の $1/2$ に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具え、

前記コアの屈折率と前記クラッドの媒質の屈折率とが等しく、および前記クラッドにおける前記回折格子を、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を埋め込んだ格子構造で構成することを特徴とする光ファイバ。

【請求項8】 前記格子構造はマトリクス状の配列であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項9】 前記格子構造は三角形の配列であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項10】 前記格子構造はハニカム形状の配列であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項11】 前記格子構造はマトリクス状の配列であり、および円柱または円孔の格子形状であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項12】 前記格子構造は三角形の配列であり、および円柱または円孔の格子形状であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項13】 前記格子構造はハニカム形状の配列であり、および円柱または円孔の格子形状であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【請求項14】 前記クラッドの全領域は、光の波長の $1/2$ に等しい格子間隔を有する回折格子から成ることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光ファイバに関し、詳しくは、光通信ネットワークおよび光信号処理に用いられる伝送媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】図1は、従来の光ファイバの構成を示す断面図である。図1において、11はコア、12はクラッド、13はジャケットである。

【0003】図2は、図1に示した従来の光ファイバの屈折率分布を示す。2a、2b、2cはそれぞれコア、クラッド、ジャケットの直径を表し、実用ファイバの代表的な値としてはそれぞれ $4\mu\text{m}$ 、 $15.9\mu\text{m}$ 、 $125\mu\text{m}$ である。

【0004】 Δn_2 、 Δn_3 は、それぞれコア11とジャケット13の屈折率差およびクラッド12とジャケット13の屈折率差を表し、両者の代表的な値は0.75%および0.11%である。

【0005】従来の光通信用光ファイバは、コア、クラッドとともに主として石英ガラスによって構成されており、コアに GeO_2 や P_2O_5 などの添加物を加えることでコアの屈折率を上昇させてコア部に光パワーを集中させて光ファイバ中の光を伝搬させる構造となっている。

【0006】この従来の光ファイバにおいては、ファイバのコア11の屈折率がクラッド12の屈折率よりも高いため、この屈折率差によって光ファイバに入射した光はファイバのコア11に閉じ込められて光ファイバ中を伝搬する。この屈折率差による光の閉じ込めを行う場合、伝搬する光の単一モード条件を満たすためにはコア径は $4\mu\text{m}$ 程度と小さい。しかしながら、光通信ネットワークおよび光信号処理の高度化に伴って、容量の高い光ファイバの提供が所望されている。

【0007】T. A. Birksらは、"Endless single-mode photonic crystal fiber", Optics Letters, vol. 22, No. 13, pp. 961-963, 1997および"Single-mode photonic crystal fiber with an indefinitely large core", Technical Digest of the 1998 Conference on Lasers and Electro-optics, CLEO, pp. 226-227において、空孔を設けないコア部分と、空孔を六角形に配列したクラッド部分とを具えた石英ガラスから成る光ファイバを開

示した。これによれば、コア径が従来の光ファイバよりも大きい、単一モード特性を保つことができる。この光ファイバにおいても、クラッドの屈折率はコアの屈折率より小さく、したがって、空孔を有しない従来の光ファイバと同様に、光は全反射により導かれる。

【0008】このような従来の光ファイバ中を短光パルスや、高出力光信号を伝搬させる際には、コアが石英ガラスで構成されているため、種々の欠点がある。すなわち、石英ガラス中の不純物による吸収および散乱、さらにはコア内に閉じこめられた光信号のピークパワーが10 mW程度を超えると、石英ガラスの光非線形光学効果によって、自己位相変調効果により光信号のスペクトル幅が増加し、およびブリュアン散乱により入射パワーが飽和する。その結果、光波形の歪みや光ファイバへの入射パワーの飽和が生じる。したがって、光ファイバ中を伝搬する光信号の伝送特性の劣化を招く。現在、最も低損失な光ファイバでも、0.2 dB/km程度の損失を生じるため、光の減衰が一層少ない光ファイバの開発が望まれている。

【0009】一方、周波数により、また偏波方向により、光の伝搬特性が根本的に影響される多次元周期構造体、いわゆるフォトニック結晶が知られている。J. D. Joannopoulosらは、Photonic Crystals, Princeton University Press, pp. 122-126, 1995において、フォトニック結晶の格子構造を開示し、また、米国特許第5,784,400号において、フォトニックバンドギャップを利用した共振空洞を開示する。さらにまた、Ulrike Gruningらは、WO 97/04340において、フォトニックバンドギャップを用いた光学構造物を開示する。しかしながら、コアの屈折率に依存せず、フォトニックバンドギャップを有するクラッドを具えた構造の光ファイバについて開示しているものはない。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】本発明の課題は、光非線形現象の影響や材料分散の影響を避けることができ、したがって、高速、高パワー光の伝送に大きな効果がある光ファイバを提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】本発明者は、このような課題を解決するために、光の波長の数倍程度の領域をもつコアと、光の波長の1/2に等しい格子間隔を有する回折格子、すなわちフォトニックバンドギャップ構造を有するクラッドを具えることにより、高速、高パワー光の伝送に大きな効果がある光ファイバを提供できることを見出した。

【0012】すなわち、本発明の第1の形態である光ファイバは、光の波長の数倍程度の領域をもつコアと、コアの周囲に配置され、光の波長の1/2に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具える。

【0013】また、本発明の第2の形態である光ファイバは、光の波長の数倍程度の領域をもち、および中空であるコアと、コアの周囲に配置され、光の波長の1/2に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具える。

【0014】さらにまた、本発明の第3の形態である光ファイバは、光の波長の数倍程度の領域をもつコアと、コアの周囲に配置され、光の波長の1/2に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設けたクラッドとを具え、コアの屈折率とクラッドの媒質の屈折率とが等しく、およびクラッドにおける回折格子は、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を埋め込んだ格子構造を有する。

【0015】本発明において、コアは、光の波長の数倍程度、好ましくは10~50ミクロンの領域である。コアを光の波長の数倍程度にすることにより、光ファイバの許容入射光パワーを大きくすることができる。

【0016】

【発明の実施の形態】本実施例による光ファイバを図3に示す。図3において、コア1は空孔であり、中に空気が入っている。コア1は空孔であるときに屈折率が最も低くなり、その屈折率は空気の屈折率に等しくほぼ1である。中空孔で構成したコアは、光の散乱要因がないため、最も好ましい。2はクラッドである。このクラッド2は、マトリクス状に空孔を配列することにより形成された回折格子を有するフォトニックバンドギャップ構造を有する。3はクラッドの外側に設けたジャケットである。

【0017】本実施例の光ファイバは、信号光のエネルギーが最も集中するコア1が中空であるため、光の散乱要因がない。したがって、本実施例の光ファイバでは、コアが石英ガラスから成る従来の光ファイバの損失よりもはるかに少ない0.01 dB/km程度の損失特性が期待できる。

【0018】図3に示すように、本発明の光ファイバは、その断面方向において、格子状の構造を有し、長さ方向には同一の構造を維持する。つまり、三次元のフォトニックバンドギャップは、格子状の点が三次元的に分布しているのではなく、長手方向に均一に存在する。したがって、本ファイバの断面は、光ファイバの作成プロセスによる形状のゆらぎを無視すれば、至る所同じ構造であり、光ファイバの長さ方向に直交または斜交するような構造は存在しない。つまり、図3のフォトニックバンドギャップクラッド2の中にある格子状の点は、長手方向に連続して延在しており、長手方向の何れの箇所でも切断しても同一の切断面となる。

【0019】図1に示した従来の光ファイバにおいては、コア11の屈折率がクラッド12よりも高く（屈折率差： $\Delta n_3 - \Delta n_2$ ）、光はコア部分に比較的強く閉じ込められるため、コア11のコア径 $2a$ のみを単に

拡大するとコア11中の単一モード条件が満たされなくなる。

【0020】光ファイバ中の基本モードは HE_{11} モードであるが、コア径 $2a$ を拡大するにつれ、高次モードである HE_{12} または HE_{21} モードが発生してコア11中に複数のモードが存在するいわゆる、多モードファイバとなり、伝送特性が劣化する。

【0021】単に、コア11の屈折率をクラッド12の屈折率よりも低くしただけでは、光のエネルギーをコア11に閉じ込めることはできない。

【0022】そこで、本発明では、クラッド2が光の波長の $1/2$ に等しい格子間隔を有する回折格子を少なくともコアに隣接する周囲領域に設ける。すなわち、クラッド2のうち少なくともコア1に隣接する周囲領域に直径 $2b$ にわたってフォトニックバンドギャップ構造を設ける。フォトニックバンドギャップ構造は、クラッド2の全領域に設けてもよい。クラッド2は、石英ガラスなどのクラッドに対する慣用の材料から構成できる。

【0023】図4はフォトニックバンドギャップの構造を示す図である。一般に三次元のフォトニックバンドギャップ構造とは、光を全方向にブラッグ反射する回折格子であり、図4に示すように回折格子の格子間隔を、伝搬する媒質内光波長の $1/2$ に設定することで実現される。

【0024】図3に示すように、このフォトニックバンドギャップ構造をコア1の周囲に直径 $2b$ にわたって設けると、光ファイバのコア1の中心から半径方向に光が伝搬しないようにコア1に光を閉じ込めて伝搬させることができる。

【0025】本発明によれば、光は全反射ではなくフォトニックバンドギャップを構成する回折格子のブラッグ反射によって波長が選択的に閉じ込められる。したがって、従来技術よりも効果的に高次モードの抑圧を行うことが可能であり、コア径を拡大しても単一モード条件の維持が可能である。

【0026】尚、ジャケットはどのような屈折率を有していてもよい。ジャケットは、ジャケットに対する慣用の材料から構成できる。

【0027】図5、図6は本発明の第2実施例を示す。

【0028】図6に示すように、コア1のコア径 $2a$ を従来のファイバのコア径 $2a'$ よりも大きく、光の波長の数倍程度とする。クラッド2は、マトリクス状に空孔を配列することにより形成された回折格子を有するフォトニックバンドギャップ構造を有する。クラッド2の媒質の屈折率を、クラッド2のフォトニック結晶の回折格子の格子部分の屈折率よりも高く設定し、両者の屈折率差を Δn_1 とする。3は、クラッド2の外側に設けた直径 $2c$ のジャケットである。

【0029】コア1は、石英ガラスなどのコアに対する慣用の材料から構成でき、コア1にフッ素を添加するこ

とによってコアの屈折率を0.5%程度下げることができる。

【0030】コア1は空孔であるときに屈折率が最も低くなり、その屈折率は空気の屈折率に等しくほぼ1である。中空孔で構成したコアは、光の散乱要因がないため、最も好ましい。

【0031】第1実施例と同様に、フォトニックバンドギャップ構造は、クラッド2の全領域に設けてもよい。クラッド2は、石英ガラスなどのクラッドに対する慣用の材料から構成できる。

【0032】ジャケットはどのような屈折率を有していてもよい。ジャケットは、ジャケットに対する慣用の材料から構成できる。

【0033】本実施例の光ファイバは、単一モードでありかつ高められた許容入射光パワーを有していた。

【0034】図7、図8は、本発明の第3実施例を示す。

【0035】図7、図8に示すように、コア1とクラッド2の媒質とを同一の屈折率、すなわち同一の材質とした。クラッド2におけるフォトニック結晶の回折格子の格子部分を空孔とせずに、クラッドを構成する媒質中に屈折率が Δn_3 だけ高い材料を格子構造の形態で埋め込む。

【0036】これにより、屈折率差 Δn_3 からフォトニックバンドギャップ構造を実現することができる。

【0037】クラッド2の周囲にはジャケット3を設けた。ジャケットはどのような屈折率を有していてもよく、慣用の材料から構成できる。

【0038】本実施例の光ファイバも、単一モードでありかつ高められた許容入射光パワーを有していた。

【0039】本実施例によれば、フォトニックバンドギャップを構成する格子が空孔ではなく、屈折率が周囲よりも高い材料で充填されているため、ファイバ全体の機械的強度が増すと同時にプリフォームからファイバを線引きする工程において格子の形状が空孔の場合よりも一定の形状に保ちやすいという利点を有する。

【0040】フォトニックバンドギャップを構成するフォトニック結晶の回折格子は、光ファイバのコア1の中心から半径方向に光が伝搬しないようにコア1内に閉じ込めることができる格子構造であれば、特に限定されない。

【0041】図9は、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料をマトリクス状に配列して埋め込んだ格子構造である。

【0042】図10は、屈折率の高い媒質中に屈折率の低い材料をマトリクス状に配列して埋め込んだ格子構造である。

【0043】図11は、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を三角形状に配列して埋め込んだ格子構造である。

【0044】図12は、屈折率の高い媒質中に屈折率の低い材料を三角形に配列して埋め込んだ格子構造である。

【0045】図13は、屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料をハニカム状に配列して埋め込んだ格子構造である。

【0046】光ファイバの材料として石英ガラスを用いた場合には、次のような方法によって屈折率を高くしたり低くしたりすることができる。

【0047】1) 屈折率を高くするとき：石英ガラスに GeO_2 を添加するか（屈折率差0.33~2%）、または P_2O_5 を添加する（屈折率差0.33~1%）。

【0048】2) 屈折率を低くするとき：石英ガラスに F（フッ素）を添加するか（屈折率差0.5%）、または空孔とする（屈折率差44%）。

【0049】したがって、上記1) および2) の屈折率を高くしたり低くしたりする方法と、純粋な石英ガラスとを含む3つの選択肢のうち2つを組み合わせることによってフォトニックバンドギャップの格子を構成することができる。

【0050】また、格子形状は円柱（円孔）に限定されることはなく、三角柱（三角孔）、四角柱（四角孔）、六角柱（六角孔）などの形状としてもよく、いずれの形状でもフォトニックバンドギャップを実現することができる。

【0051】屈折率の低い媒質中に屈折率の高い材料を埋め込んで回折格子を構成する場合には、コアの屈折率を、クラッドの媒質の屈折率と等しくしてもよい。

【0052】本発明の光ファイバにおいては、従来通り、クラッドの外側にさらにジャケットを設けてもよいが、フォトニックバンドギャップ構造のクラッドがコアを保護するに十分な強度であれば、ジャケットを特に設ける必要がなく、十分な強度を有するようにフォトニックバンドギャップ構造のクラッド自体を厚くしてもよい。そのような構造とした場合には、コアを除くファイバの全ての部分がフォトニックバンドギャップ構造となる。

【0053】本発明の光ファイバは、従来の偏波保持ファイバ製造技術を応用することによって製造可能である。図14に偏波保持ファイバの構造を示す。図14において、A1はコア、A2は応力付与部、A3はクラッドである。まず、ファイバを線引きする前の光ファイバのブリフォームの応力付与部A2に相当する部分に予め空孔を設ける。次にこの空孔部分に応力付与のための材料を充填し、その後、ブリフォームを線引きすることにより偏波保持ファイバを製造できる。

【0054】この偏波保持ファイバの製造技術と同じ技法でフォトニックバンドギャップ構造のクラッドを製造することができる。本発明の場合には、ブリフォームの段階でフォトニックバンドギャップに相当する部分に設

けた空孔を残しておいたまま、次にファイバを線引きする。

【0055】それに代わる製造方法としては、複数本の六角形状のガラス棒を用いて製造する。まず、図15に示すように、中心部分が空孔であるかまたは屈折率の異なる物質を充填した六角形状のガラス棒を用意し、次にこのガラス棒を図16に示すように複数本束ねて、断面をちょうど蜂の巣状にする。そして、蜂の巣状に束ねたガラス棒の束を引き延ばすことによって本発明の光ファイバを製造することができる。

【0056】

【発明の効果】本発明の光ファイバは、コアの屈折率をクラッドの屈折率よりも高くすることによって、入射した光をコアに閉じ込めて伝搬する従来の光ファイバとは異なり、コアの屈折率に依存することなく、フォトニックバンドギャップ構造を有するクラッドを具えた構造にすることによって、光非線形現象の影響や材料分散の影響を避けることができ、したがって、高速、高パワー光の伝送に対応することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来例の光ファイバを示す断面図である。

【図2】図1に示した光ファイバの屈折率分布図である。

【図3】本発明による光ファイバの一実施例を示す断面図である。

【図4】フォトニックバンドギャップの構成を示す断面図である。

【図5】本発明による光ファイバの他の実施例を示す断面図である。

【図6】図5に示した光ファイバの屈折率分布図である。

【図7】本発明による光ファイバの他の実施例を示す断面図である。

【図8】図7に示した光ファイバの屈折率分布図である。

【図9】回折格子の配列の形状の例を示す断面図である。

【図10】回折格子の配列の形状の他の例を示す断面図である。

【図11】回折格子の配列の形状の他の例を示す断面図である。

【図12】回折格子の配列の形状の他の例を示す断面図である。

【図13】回折格子の配列の形状の他の例を示す断面図である。

【図14】偏波保持ファイバの構造を示す断面図である。

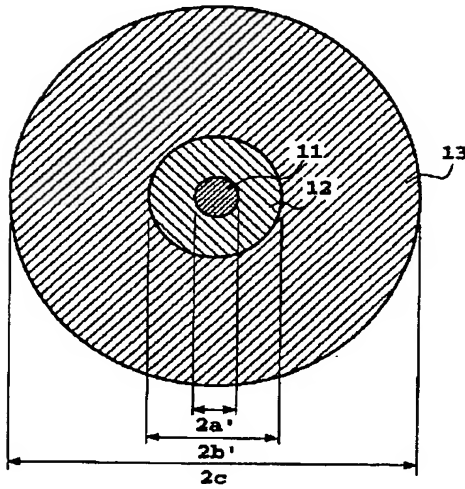
【図15】本発明の光ファイバの製造に使用される中心部分が空孔であるかまたは屈折率の異なる物質を充填した六角形状のガラス棒の断面図である。

【図16】蜂の巣状に束ねられた複数本の六角形状のガラス棒の断面図である。

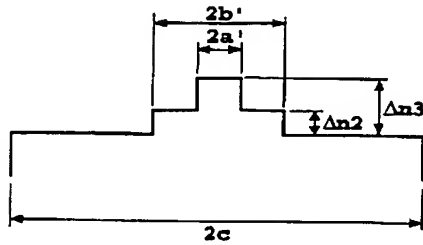
【符号の説明】

- 1、11 コア
2、12 クラッド
3、13 ジャケット

【図1】

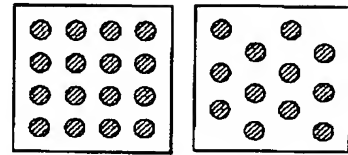


【図2】



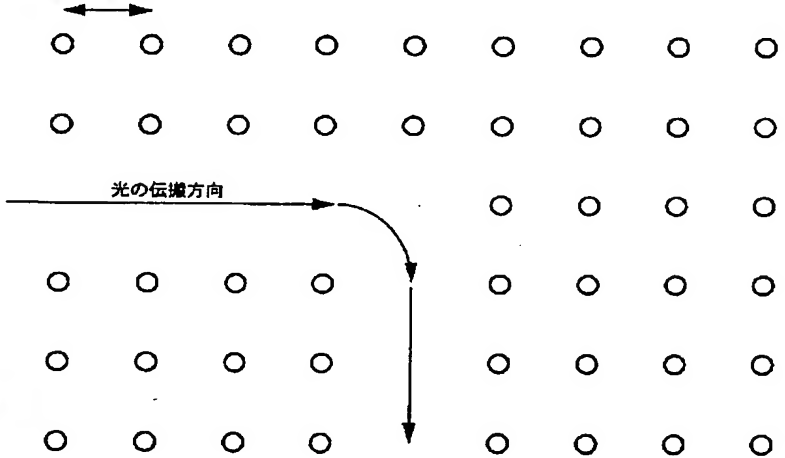
【図9】

【図11】

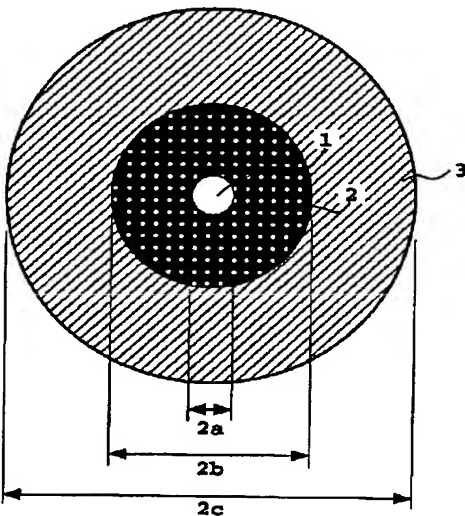


【図4】

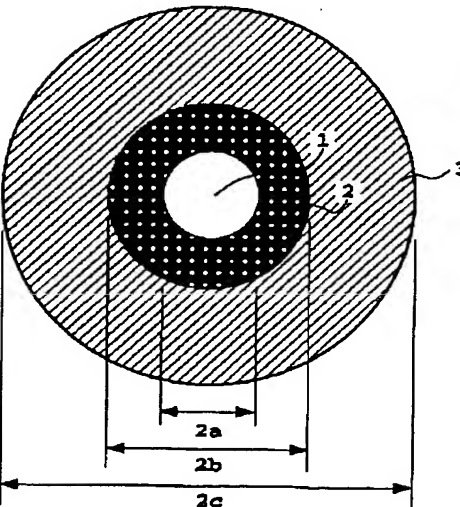
格子間隔 = $\lambda/2$



【図3】

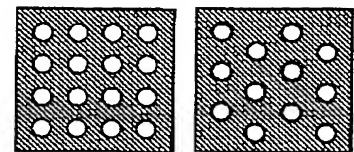


【図5】

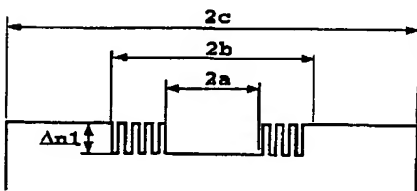


【図10】

【図12】

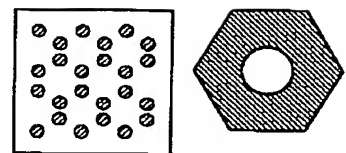


【図6】

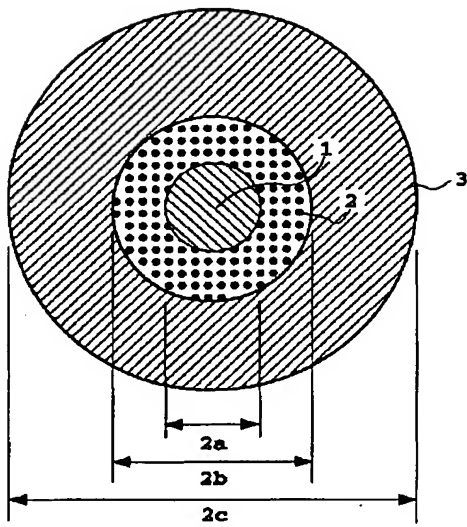


【図13】

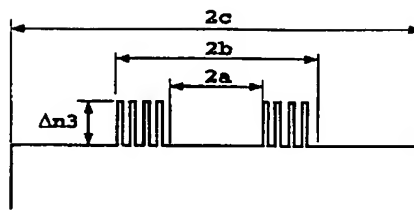
【図15】



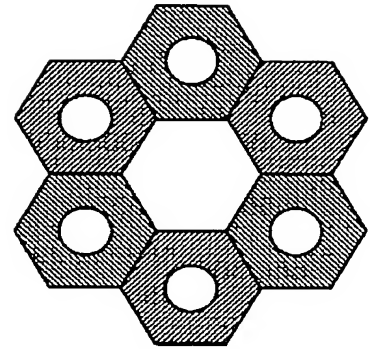
【図 7】



【図 8】



【図 16】



【図 14】

